

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra výrobních strojů a konstruování

Bubnová sušička

Drum Dryer

Student:

Roman Hejný

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Zdeněk Noga, CSc.

Ostrava 2014

Zadání bakalářské práce

Student: **Roman Hejný**
Studijní program: **B2341 Strojírenství**
Studijní obor: **2302R010 Konstrukce strojů a zařízení**
Specializace: **21 Konstrukce výrobních strojů a zařízení**
Téma: **Bubnová sušička
Drum Dryer**

Zásady pro vypracování:

Pro potřebu fy Biomac s.r.o. navrhnete úpravu bubnové sušičky BS-6 s cílem zvýšení výkonu zařízení o 100% katrovaných sušených pilin za hodinu. Pozornost zaměřte zejména na konstrukční úpravu bubnu sušičky a související technologické zařízení ovlivněné zvýšeným výkonem.
Proveďte :

1. Technickou zprávu s popisem funkce navrženého zařízení a nezbytnými výpočty ve členění – seznam požadavků, funkční struktura, morfologická matice, orgánová a hrubá stavební struktura.

2. 3D model konstrukčního návrhu zařízení.

3. Výrobní výkresovou dokumentaci úpravy bubnu sušičky.

Rozsah výtahu z rešerše z Bakalářského projektu v textové části práce cca 5str., rozsah výkresové části min. 1A0

Seznam doporučené odborné literatury:

ČSN 01 6910 *Úprava písemností psaných strojem nebo zpracovaných textovými editory.*

Praha: Český normalizační institut, srpen 1997. 36 s.

ČSN ISO 690 *Bibliografické citace. Obsah, forma a struktura.*

Praha: Český normalizační institut, 1996. 32 s.

HUBKA, V. *Konstrukční nauka.*

Zürich: Heurista, 1995. 105s. ISBN 80-90 1135-0-8

Zásady pro vypracování diplomové (bakalářské) práce.

FS_SME_05_003 verze: G

LITERÁRNÍ REŠERŠE – zpracovaná v rámci Bakalářského projektu

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Zdeněk Noga, CSc.**

Datum zadání: 17.02.2014

Datum odevzdání: 19.05.2014

doc. Dr. Ing. Ladislav Kovář
vedoucí katedry



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne.....

.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mě požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на вѣдомі, že odevzdáním své bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne.....

podpis studenta

Jméno a příjmení autora práce:

Roman Hejný

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Šumvald 38, 783 85, Šumvald

Anotace bakalářské práce

HEJNÝ, R. *Bubnová sušička*: Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra výrobních strojů a konstruování, 2014, 52 s. Bakalářská práce, vedoucí Ing. Zdeněk Noga, CSc.

Bakalářská práce se zabývá konstrukční úpravou bubnové sušičky BS-6 s cílem zvýšení výkonu zařízení o 100% sušených pilin za hodinu. V úvodu popisuje vlastnosti biomasy a její sušení pro následné zpracování jako biopaliva. Obsahem dalších kapitol je technická zpráva složená z upřesněných požadavků na zařízení ve formě požadavkového listu, funkční struktury, orgánové struktury a hrubé stavební struktury. Práce představuje zejména konstrukční úpravu bubnu sušičky a související technologické zařízení ovlivněné zvýšeným výkonem.

Annotation of bachelor thesis

HEJNÝ, R. *Drum dryer*: Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Production Machines and Design, 2014, 52p. Thesis head: Ing. Zdeněk Noga, CSc.

Bachelor's study is about structural adjustment of a tumble dryer BS-6 in order to increase device output by 100% of dried sawdust per one hour. In the introduction are described properties of biomass and its drying for subsequent processing as a biofuel. The technical report creates the content of the next chapters. The technical report compounds from the specified equipment requirements in the form of the request sheet, functional structure, organ structure and raw building structures. The work represents especially structural adjustment of dryer's drum and related technological equipment affected by increased output.

Obsah

Seznam použitých značek	8
Úvod.....	12
1 Biomasa.....	13
1.1 Rozdělení biomasy	13
1.2 Charakteristické vlastnosti biomasy	14
1.3 Zpracování biomasy na tuhá paliva	15
1.3.1 Briketování	15
1.3.2 Peletování	16
2 Princip a technologie sušení.....	17
2.1 Princip sušení.....	17
2.2 Kinetika sušení	17
3 Druhy sušících zařízení	18
3.1 Bubnové sušárny.....	18
3.1.1 Bubnová sušárna BUS 1000	18
3.1.2 Bubnová sušárna BS-6	19
3.1.3 Bubnová sušárna společnosti DIEFFENBACHER	20
3.1.4 Jednoplášťová bubnová sušárna	21
3.2 Ostatní typy sušáren.....	22
4 Konstrukční návrh.....	23
4.1 Specifikace požadavků	23
4.1.1 Zadané požadavky	23
4.1.2 Vedlejší požadavky.....	23
4.2 Transformační proces	23
4.3 Požadavkový list.....	24
4.4 Blokové schéma funkční struktury	25

4.5	Technický proces	26
4.6	Funkční struktura	26
4.7	Morfologická matice.....	27
4.8	Hrubá stavební struktura.....	28
4.8.1	Vybraná řešení	28
4.8.2	Vybraná řešení	29
5	Pohyb sušeného materiálu bubnem	31
6	Výpočet	32
6.1	Bilance sušeného materiálu	32
6.2	Tepelná bilance sušárny.....	33
6.3	Výpočet potřebného objemu bubnu.....	34
6.4	Vlastnosti paliva	35
6.5	Stechiometrie	36
6.5.1	Minimální objemy vzduchu a spalin z prvkového rozboru paliva	36
6.5.2	Minimální objemy vzduchu a spalin z hrubého rozboru paliva	38
6.5.3	Součinitel přebytku vzduchu a skutečné objemy vzduchu a spalin.....	39
6.5.4	Entalpie spalin	40
6.5.5	Doplňující výpočty	41
6.6	Pevnostní výpočet.....	43
6.6.1	Kontrola připojovacích šroubů prodlouženého bubnu	43
6.6.2	Výpočet třecí síly.....	46
7	Závěr	48
	Seznam použité literatury	49
	Seznam obrázků.....	50
	Seznam tabulek.....	51

Seznam použitých značek

Symbol	Význam	Jednotka
\dot{m}_A	Množství vlhkého materiálu	[kg/hod]
\dot{m}_B	Množství usušeného materiálu	[kg/hod]
\dot{m}_{ov}	Množství odpařené vody	[kg/hod]
\dot{m}_{sm}	Množství suchého materiálu	[kg/hod]
\dot{m}_{vA}	Množství vody v sušeném materiálu	[kg/hod]
\dot{m}_{vB}	Množství vody v suchém materiálu	[kg/hod]
V_{O_2min}	Min. množství kyslíku ke spálení 1kg paliva	[m ³ /kg]
V_{SVmin}	Min. množství such. vzd. ke spálení 1kg paliva	[m ³ /kg]
V_{VVmin}	Min. množství vlh. vzd. ke spálení 1kg paliva	[m ³ /kg]
ω_A	Vlhkost materiálu na vstupu	[%]
ω_B	Vlhkost materiálu na výstupu	[%]
G_B	Zatížení samotného bubnu	[N]
G	Zatížení prodlouženého bubnu	[N]
F_M	Momentová síla	[N]
F_N	Posouvající síla	[N]
F_O	Celková svěrná síla	[N]
F_t	Třecí síla	[N]
F_{oi}	Svěrná síla v jednom šroubu	[N]
H_2	Obsah vodíku	[%]
I_{vzdmin}	Entalpie minimálního množství vzduchu	[kJ/kg]
I_{SP}	Entalpie spalin při přebytku vzduchu	[kJ/kg]
I_{SPmin}	Entalpie minimálního množství spalin	[kJ/kg]
I_{vzd}	Entalpie vzduchu	[kJ/kg]
N_2	Obsah dusíku	[%]
O_2	Obsah kyslíku	[%]
Q_c	Celkové potřebné teplo	[MJ]
Q_i	Výhřevnost paliva	[MJ/kg]
Q_{ohv}	Teplo potřebné k ohřevu vody	[MJ]
Q_{ohvp}	Teplo potřebné k ohřevu vodní páry	[MJ]

Q_{ov}	Teplo potřebné k odpaření vody	[MJ]
R_A	Celková reakce působící na přední kladky bubnu	[N]
R_{AK}	Reakce v přední kladce bubnu	[N]
R_B	Celková reakce působící na zadní kladky bubnu	[N]
V_{Ar}	Objem A_r ve spalínách	[m ³ /kg]
V_{CO_2}	Objem CO_2 ve spalínách	[m ³ /kg]
V_{CO_2max}	Maximální množství CO_2 ve spalínách	[%]
V_{H_2O}	Skutečné množství vodní páry	[m ³ /kg]
V_{H_2Omin}	Minimální objem vodní páry ve spalínách	[m ³ /kg]
V_{N_2}	Objem N_2 ve spalínách	[m ³ /kg]
V_{SO_2}	Objem SO_2 ve spalínách	[m ³ /kg]
V_{CEL}	Množství spalin vstupujících do sušárny	[m ³ /hod]
V_{CELout}	Množství spalin vystupujících ze sušárny	[m ³ /hod]
V_{SSmin}	Minimální množství suchých spalin	[m ³ /kg]
V_{SVmin}^{SP}	Min. množství such. vzduchu o výhřevnosti Q_i	[m ³ /kg]
V_{VSmin}	Minimální množství vlhkých spalin	[m ³ /kg]
V_{VSmin}^{SV}	Min. množ.vlh. spalin při použití suchého vzduchu	[m ³ /kg]
V_{VS}	Skutečné množství vlhkých spalin	[m ³ /kg]
c_v	Měrná tepelná kapacita vody	[J/kg · K]
c_{vp}	Měrná tepelná kapacita vodní páry	[J/kg · K]
i_{Ar}	Entalpie složek spalin při 500°C	[kJ/m ³]
i_{CO_2}	Entalpie složek spalin při 500°C	[kJ/m ³]
i_{H_2O}	Entalpie složek spalin při 500°C	[kJ/m ³]
i_{N_2}	Entalpie složek spalin při 500°C	[kJ/m ³]
i_{SO_2}	Entalpie složek spalin při 500°C	[kJ/m ³]
\dot{m}	Množství paliva	[kg/h]
\dot{m}_p	Průměrný hodinový výkon bubnu	[kg/hod]
t_{mA}	Počáteční teplota vstupujícího do sušky	[°C]

t_{mB}	Teplota materiálu vystupujících ze sušárny	[°C]
t_{sB}	Teplota spalin vystupujících ze sušárny	[°C]
t_v	Teplota varu vody	[°C]
x_{1B}	Vlhkost spalin vstupujících do sušárny	[–]
x_{2B}	Vlhkost spalin vystupujících ze sušárny	[–]
ρ_{syp}	Sypná hustota látky	[kg/m ³]
ρ_A	Měrná hustota pilin na vstupu	[kg/m ³]
ρ_B	Měrná hustota pilin na výstupu	[kg/m ³]
σ_{dovt}	Dovolené napětí v tahu	[MPa]
σ_{red}	Redukované napětí	[MPa]
σ_t	Napětí v tahu	[MPa]
$\omega_{VS\ Ar}$	Objemové podíly ve vlhkých spalinách	[%]
$\omega_{VS\ CO_2}$	Objemové podíly ve vlhkých spalinách	[%]
$\omega_{VS\ N_2}$	Objemové podíly ve vlhkých spalinách	[%]
$\omega_{VS\ SO_2}$	Objemové podíly ve vlhkých spalinách	[%]
$\omega_{VS\ vzd}$	Objemové podíly ve vlhkých spalinách	[%]
Ro	Poloměr od středu bubnu ke špičce lopatky	[m]
Yq	vzdálenost letu	[m]
θ	Úhlová poloha špičky lopatky	[°]
φ	Sypný úhel	[°]
A_r	Obsah popele	[%]
C	Obsah uhlíku	[%]
S	prchlavé složky síry	[%]
V	Potřebný objem bubnu pro daný výkon	[m ³]
W	Obsah vody	[%]

f	Faktor poměrného zvětšení	$[-]$
f_t	Součinitel tření	$[-]$
γ	Úhel stoupání závitu	$[^\circ]$
ε	Součinitel plnění	$[-]$
τ	Smykové napětí	$[\text{MPa}]$
φ'	Úhel tření v závitu	$[^\circ]$

Úvod

S rostoucí populací roste i spotřeba energie, kterou lidé potřebují ke každodennímu životu ve formě tepla, světla nebo jiné podobě. V dnešní době svět trpí rychlým poklesem zásob fosilních paliv a stále více se využívá obnovitelných zdrojů energie. Velice úspěšným obnovitelným zdrojem energie je právě biomasa, ve které se ukládá sluneční energie, kterou pak přeměníme na energii ve formě tepla, pohonných hmot či elektřiny. V našem případě se jedná o výrobu tuhých paliv ve formě briket či pelet. Jedná se o technologie, které mokrou a velmi objemnou dřevní biomasu na drtící lince rozdrtí, následně vysuší na požadovanou výhřevnost a poté slisují do malého objemu a ještě zabalí do prodejního balení. Jde o konvekční sušení, kde sušený materiál je ve styku se sušícím médiem.

Cílem této práce pro potřebu firmy Biomac s.r.o. je navýšení výkonu bubnové sušárny typu BS-6 pro výrobu biopaliv. Podnětem k návrhu je snaha dosáhnout vyšší produktivity oproti stávající výrobě.

1 Biomasa

Biomasa je definována jako organická hmota rostlinného původu, která je biologicky rozložitelná a může být využita pro spalování či jiných přeměn s energetickým využitím. Hlavní výhodou využití biomasy v energetice je její nevyčerpatelnost (obnovitelnost) jako zdroje energie.

1.1 Rozdělení biomasy

Biomasu můžeme dělit podle různých kritérií. Základní dělení biomasy pro energetické využití se z podstaty věci dělí dle formy na biomasu kapalnou, plynou a tuhou. V praxi se můžeme setkat s jiným dělením, které vyplývá z původu hmoty, tedy zemědělskou biomasu, lesní a ostatní zbytkovou.

- **zemědělská biomasa** (fytomasa – bylinný původ a zemědělské plodiny)
 - cíleně pěstovaná biomasa
 - biomasa obilovin a olejnin
 - trvalé travní porosty
 - rychle rostoucí dřeviny pěstované na zemědělské půdě
 - rostlinné zbytky ze zemědělské prvovýroby a údržby krajiny
- **lesní biomasa** (dendromasa)
 - palivové dřevo
 - zbytky z dřevozpracujícího průmyslu, prořezávek a probírek
 - lesní těžařské zbytky a odpadky
- **zbytková biomasa**
 - vedlejší produkty a zbytky z papírenského průmyslu
 - vedlejší produkty a zbytky z potravinářského průmyslu
 - vedlejší produkty a zbytky z živočišného průmyslu
 - lihovarnické výpalky
 - čistírenské kaly
 - biologicky rozložitelné odpady
 - pokrutiny a mláto

1.2 Charakteristické vlastnosti biomasy

Praktické využití biomasy pro energetické účely je spojeno s poměrně vysokým kolísáním její kvality. Fyzikální a chemické vlastnosti biomasy můžeme hodnotit jako běžná tuhá paliva. Z hlediska vhodnosti pro spalování jsou nejdůležitějšími vlastnostmi biomasy:

- **Vlhkost** – je jedna z nejdůležitějších vlastností, která má bezprostřední vliv na výhřevnost a celkový spalovací proces. Palivo v dřevozpracujícím průmyslu má obvykle vyšší vlhkost než palivo v průmyslu zemědělském. U čerstvě pokácených stromů může hodnota vlhkosti přesahovat i 60%, při takovémto obsahu vody už výhřevnost nestačí ani pro spalovací proces. Pro dokonalý spalovací proces musí obsahovat palivo co nejnižší obsah vody.
- **Výhřevnost** – při spalovacích procesech se uvolňuje teplo, které se vztahuje k hmotnosti tuhého paliva a vyjadřuje se v MJ.kg⁻¹. Uvolněné teplo se vyjadřuje buďto jako spalné teplo nebo výhřevnost paliva. Spalné teplo je definováno jako množství tepla, které se uvolní při dokonalém spálení paliva (1 kg nebo 1 m³) při ochlazení spalin do původní teploty paliva (0 °C), kdy veškerá pára ve spalinách zkondenzovala, nebo-li odevzdala veškeré své teplo. Výhřevnost je množství tepla uvolněného z paliva, přičemž vlhkost paliva zůstane ve spalinách spolu s tepelnou energií, použitou na přeměnu vody ve vodní páru.
- **Obsah popela** – v kůře stromu je obsah popela vyšší než v samotném dřevě. Toto je dáno zřejmě znečištěnou zeminou, jak v průběhu růstu, tak při kácení a následném stahování na požadované místo. Obsah popela ve dřevě je nižší než u ostatních tuhých paliv. Čisté dřevo bez kůry obsahuje 0,25 - 0,5% popela, stromová kůra pak podle znečištění při těžbě může obsahovat 2,5 - 8,0 % popela. Popel po spálení dříví obsahuje množství živin (fosfor, draslík) a stopových prvků. Popel se může využít jako navrácení živin do půdy, které vyčerpal strom během jeho růstu.

1.3 Zpracování biomasy na tuhá paliva

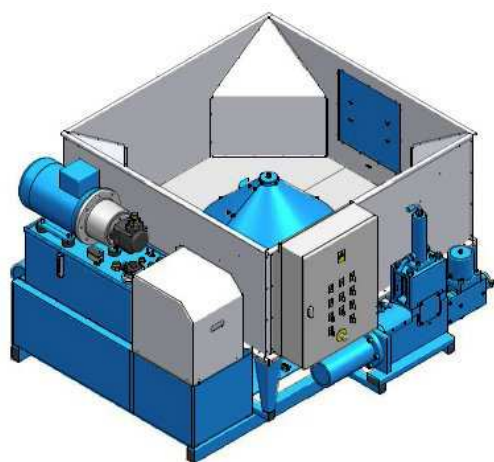
Pro další zpracování biomasy je nutná její úprava. Jedná se především o úpravu velikosti a snížení vlhkosti. K úpravě velikosti slouží štepovačky, drtiče a další rozmělnovače. Pro snížení vlhkosti jsou určeny různé druhy sušících zařízení. Takto upravená biomasa se dále zpracovává ve formě briket nebo pelet. Hlavním důvodem mechanického zpracování biomasy je snížení objemu dřevěných pilin, hoblin, kůry apod. Následným vysokotlakým lisováním dostaneme palivo s vysokou výhřevností, nízkým obsahem popelovin, malým objemem a tím danou dlouhou dobou hoření. Následné spalování probíhá s minimálními negativními účinky na ekologii. Proto jsou tyto paliva považovány za palivo budoucnosti.

1.3.1 Briketování

Jednou z nejširších využití biomasy je výroba briket. Výchozím materiálem pro výrobu briket může být zrnitý dřevní odpad, jako jsou dřevěné piliny, třísky, stromová kůra či lesní štěpka o vlhkosti $10 \div 12 \%$. Při vyšší vlhkosti se briketa může rozpadat. Brikety jsou většinou válcové od průměru 60 mm a délky $150 \div 250$ mm. Výhřevnost briket je v rozmezí $16 \div 18,5$ MJ/kg dle vlhkosti usušeného materiálu. Základním zařízením je briketovací lis, který lisuje dřevní hmotu pod vysokým tlakem za zvýšené teploty bez jakéhokoliv pojiva. Pro velké výkony nad 1000 kg/hod se k lisování používají mechanické lisy klikové (setrvačnickové), kde hlavním členem je klikový mechanismus. Pro střední a malé výkony od 50 do 500 kg/hod se používají lisy hydraulické nebo šnekové pracující na principu „mlýnku“.



Obrázek 1 Mechanický briketovací lis [1]



Obrázek 2 Hydraulický briketovací lis [1]

1.3.2 Peletování

Jedná se zpravidla o granule kruhového průřezu o $6 \div 14$ mm a délce $1 \div 5$ cm, které jsou vyrobeny především z dřevní hmoty, suchých pilin o vlhkosti $12 \div 13$ %. Pelety se lisují za vysokého tlaku a vysokých teplot na protlačovacích matricových lisech. Pelety mohou být světlé z čisté biomasy bez kůry vykazující popelnatost do 0,7 % nebo pelety tmavé z biomasy s podílem stromové kůry vykazující pak vyšší popelnatost 0,7-3 %. Pelety se vyrábí bez chemických přísad, jelikož dřevní hmota obsahuje celulózu, která při zvýšené teplotě měkne a stává se lepivou. Po vychladnutí pak mají vysokou pevnost a soudržnost. Pelety patří mezi nejušlechtlejší dřevní palivo s nízkým obsahem popelovin a jejich výhřevnost se pohybuje okolo $16 \div 18,5$ MJ/kg.



Obrázek 3 Granulační lis 1000kg/hod [1]



Obrázek 4 Peletovací lis 50kg/hod [1]

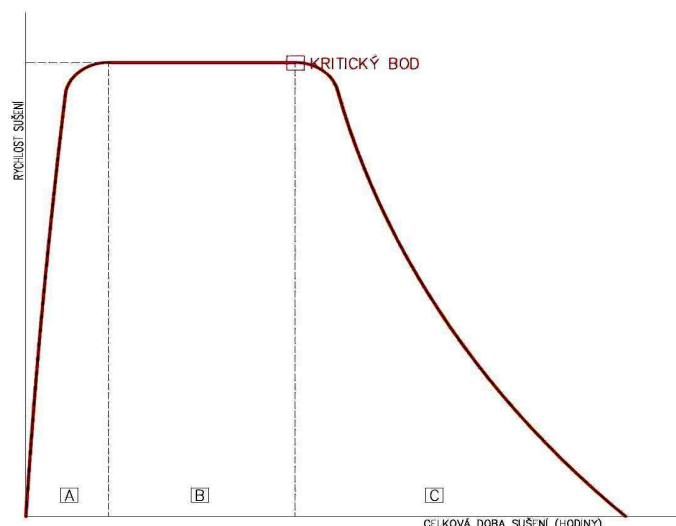
2 Princip a technologie sušení

2.1 Princip sušení

Sušení je obecně fyzikálně-chemický proces ve kterém se odstraňuje kapalina obsažená v materiálu za použití různých metod. Sušícím médiem může být vzduch či spaliny. Při sušení dochází ke sdílení tepla a hmoty. Ke sdílení potřebného tepla k odpaření vody dochází v sušárně výhradně konvekcí ze vzduchu do sušeného materiálu. Sušení z hlediska sdílení hmoty považujeme jako difúzní proces. Při odpařování kapaliny z materiálu se narušuje rovnováha vlhkosti. Vnitřní část sušené části materiálu má vyšší obsah vlhkosti a nižší teplotu než na povrchu části materiálu. Rozdílem obsahu vlhkosti povrchových a vnitřních vrstev vzniká gradient vlhkosti. Cílem sušení je tedy snížení hmotnosti, změna vlastností materiálu (zvýšení výhřevnosti) nebo snížení objemu pro usnadněnou manipulaci dalšího zpracování.

2.2 Kinetika sušení

- **údobí ohřevu (A)** – Rychlost sušení rychle stoupá až do maximální hodnoty. Přiváděné teplo se v tomto údobí spotřebuje hlavně na ohřev sušené látky a to do té doby než teplo předávané dosáhne rovnováhy s teplem výparným.
- **údobí stále rychlosti sušení (B)** – V tomto údobí se rychlost sušení drží na maximální hodnotě, která byla dosažena v údobí ohřevu až do určité hodnoty, kterou nazýváme vlhkostí kritickou (kritický bod). Toto údobí je charakterizováno dostatkem vlhkosti přiváděného z vnitřku látky na její povrch. Povrch v tomto údobí se chová z hlediska odpařování stejně jako volný povrch odpařované kapaliny. Tlak páry nad povrchem sušené látky je tedy stejný jak nad volným povrchem kapaliny, a proto bude i rychlost sušení stejná jako u volného povrchu kapaliny.
- **údobí klesající rychlosti sušení (C)** – V této části probíhá odpařování vázané vody. Po dosažení kritické vlhkosti přestane celý povrch materiálu pokrývat vrstva kapaliny, protože v sušené látce není dostatek vlhkosti. Tlak par nad povrchem látky v tomto údobí klesá až na nulu a rovná se parciálnímu tlaku par v sušícím plynu. V tomto bodě tedy teplota látky dosáhne teploty sušícího média a vlhkost materiálu je rovna vlhkosti rovnovážné.



Obrázek 5 Průběh rychlosti sušení [2]

3 Druhy sušících zařízení

Sušárny jsou obecně zařízení, ve kterých se přívodem tepla odstraňuje nežádoucí vlhkost z materiálu vypařováním nebo sublimací. Nejběžnějším sušícím médiem jsou spaliny nebo vzduch. Sušárny lze rozdělit podle různých kritérií. Hlavním kritériem je způsob manipulování materiálem (mechanické, pneumatické) a podle způsobu přívodu tepla (konvekce, kondukce). V této kapitole budou popsány především sušárny bubnové, protože jsou předmětem mé bakalářské práce.

3.1 Bubnové sušárny

3.1.1 Bubnová sušárna BUS 1000

Příhrnovací šnek je schopný nahrnovat materiál ze skládky pilin na dopravníky. Mokrý piliny jsou vytříděny vibračním sítem umístěným nad zásobníkem vlhkého materiálu. Hrubé kusy z třídiče vypadávají skluzem do kontejneru a mohou být ručně přiloženy do kotle. Bubnová sušárna pilin je vytápěná spalinami z kotle na automatizované spalování dřevěného odpadu. Dávkování pilin do sušárny je regulováno řídicím systémem tak, aby výstupní teplota páry ze sušárny se udržovala na konstantní hodnotě. Řídicí systém rovněž reguluje přikládání paliva do kotle. Spaliny se míchají se studeným vzduchem na teplotu 300 až 500 °C a jsou do sušárny nasávány ventilátorem. Ventilátor je umístěn za sušárnou a cyklonem pro odlučování prachu. Suché piliny jsou vyhrnovány ze

sušárny šnekovým dopravníkem, který plní funkci turniketu. Dále jsou dopravovány šnekovým dopravníkem k dalšímu zpracování. U této sušárny lze dosáhnout odpařivosti 600kg/hod vody.[3]



Obrázek 6 Bubnová sušárna pilin BUS [3]

3.1.2 Bubnová sušárna BS-6

Sušárna BS-6 byla vyráběna Rudnými a nerudými doly v Ejpovicích, dle licence fy PROMILL. Vlhký materiál je dopraven na dávkovací dopravník sušárny, který automaticky reguluje její přísun podle výstupní teploty sušících plynů do podávacího šneku, který dopraví materiál na skluz a do sušícího bubnu. V kotli dochází ke spalování tuhých paliv. Vzniklé spaliny proudí do dohořivací komory, kde se ochladí na požadovanou sušící teplotu. Spaliny proudí do tříplášťového sušícího bubnu opatřeného lopatkami, kde přichází do styku s vlhkým materiálem, který padá po ohnivzdorném skluzu do vnitřního pláště sušícího bubnu. Na konci vnitřního pláště se proud spalin s částečně usušeným materiálem obrací, prochází mezi vnitřním a středním pláštěm, znovu se obrací a prochází mezi středním a vnějším pláštěm a dále je pak odsáván potrubím do cyklonu (odlučovače sušiny), kde se usušená hmota odlučuje od spalin. Při tomto procesu se sušící buben otáčí kolem své podélné osy. Pohyb horkých spalin a sušené hmoty zajišťuje hlavní odstředivý ventilátor. V potrubí mezi sušícím bubnem a cyklonem je umístěn lapač kamení pro odstranění těžších předmětů z procesu. Sušina se soustřeďuje ve spodní části cyklonu, odtud je dávkována turniketem (vzduchovým uzávěrem) do šrotovníku. Mezi turniketem a šrotovníkem je zamontován skluz s klapkou, který umožňuje v případě potřeby vypustit usušenou hmotu mimo šrotovník. Materiál je dále zpracováván ve formě pelet nebo briket.

Spaliny odloučené v cyklonu jsou odsávány odstředivým ventilátorem do komína. Celá technologie sušící linky je automatizována. U této sušárny lze dosáhnout výkonu až 1t/hod usušeného materiálu při koncové vlhkosti 12% s odpařivostí $\pm 700\text{kg/hod}$.



Obrázek 7 Sušící buben BS-6 [4]

3.1.3 Bubnová sušárna společnosti DIEFFENBACHER

Jedná se o sušárnu německé firmy Dieffenbacher s mnohonásobně větším výkonem než v předchozích zmiňovaných sušárnách. Spaliny z roštu jsou před vstupem do samotného bubnu očištěny cyklony. Jednocestný buben křížové vestavby umožňuje sušení různých materiálů. Pohon bubnu umožňuje řetězové kolo s frekvenčním měničem. Materiál je společně se sušícím médiem odsáván pomocí hlavního ventilátoru do odlučovací komory, kde se hrubý materiál oddělí a je připraven pro další zpracování a jemný materiál spolu s prachovými částicemi je odsáván do sériově uložených cyklonů, kde se odloučí od sušícího média. Bubnová sušárna je chráněna systémem proti výbuchu s tlakovou úlevou. U této sušárny lze dosáhnout odpařivosti od 5. do 65t/hod.



Obrázek 8 Bubnová rotační sušárna společnosti DIEFFENBACHER [5]

3.1.4 Jednoplášťová bubnová sušárna

Sušárna určená k sušení pilin i jiných materiálů se skládá z topného zařízení, dávkovacího zařízení, jednoplášťového sušicího bubnu, převodového ústrojí, vypouštěcího ústrojí, cyklonového odlučovače a hlavního ventilátoru. U této sušárny lze dosáhnout až 60. % tepelné účinnosti. Tato sušárna pracuje na stejném principu jako v předchozích zmiňovaných sušárnách. Dle velikosti lze u této sušárny dosáhnout výkonu od 1 do 58 t/h sušeného materiálu.



Obrázek 9 Jednoplášťová bubnová sušárna [6]

3.2 Ostatní typy sušáren

Šachtová sušárna

Sušícím médiem jsou spaliny, které proudí příčně do sušeného materiálu. Příčné proudění zmenšuje tlakové ztráty a zvyšuje rychlost sušení. Sušárna je opatřena vestavbami pro lepší promíchávání materiálu. V této sušárně můžeme sušit sypké materiály, obilí nebo dřevěné uhlí.

Rozprašovací sušárna

Sušárna je tvořena svislým válcem s konickým zúžením v dolní části. Sušený materiál se rozprašuje pomocí sprchové růžice s tryskami nebo rychle se otáčejícího kotouče do proudu horkého vzduchu. Rozprašené kapičky sušeného materiálu jsou malé (10 až 100 μm), mají rychlost až 100 m/s a odpařením kapaliny z nich vzniká jemný prášek. Vzduch mění v sušárně směr a podél pláště odchází přes cyklon nebo filtr ven. Suchý práškový materiál se seškrabuje ze dna sušárny.

Proudová (pneumatická) sušárna

Sušárna je sou proudé zařízení, kde vlhký materiál je unášen vlhkým vzduchem. Rychlost sušícího vzduchu musí být vyšší než usazovací rychlost částic. V odlučovači se odděluje suchý materiál a ventilátor odvádí vlhký vzduch do ovzduší. Sušárna se používá pro jemnozrnné produkty, které snesou pouze několikasekundový styk mezi materiálem a sušícím plynem.

4 Konstrukční návrh

Navrhnete rekonstrukci bubnové sušárny typu BS-6. Sušárna o stávajícím výkonu 1t/hod má být upravena na požadovaný výkon 2t/hod usušených katrových pilin. Základem je stanovit požadavky které má sušárna splňovat.

4.1 Specifikace požadavků

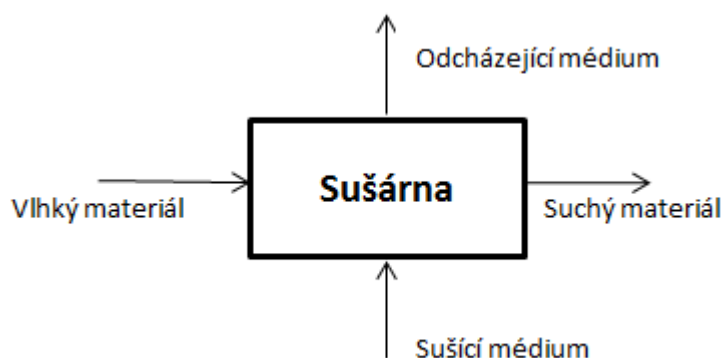
4.1.1 Zadané požadavky

- Navýšení výkonu na 2t/hod usušených pilin
- Navrhnout těsnění na výstupu bubnu
- Zvětšit objem bubnu prodloužením jeho zadní části
- Navrhnout výpadovou komoru za bubnem
- Žádná část zařízení nesmí jít pod úroveň podlahy haly

4.1.2 Vedlejší požadavky

- Sušený materiál je složen buďto z čistých katrových pilin (hlavní případ), nebo ze stromové kůry, anebo z lesní štěpky
- Velikost částic je v každém případě v rozmezí $(0 \div 10)$ mm
- Zdroj tepla bude kotel Fiedler topený suchým palivem s $\omega \leq 20\%$
- Vstupní vlhkost $\omega_A = (40 \div 60)\%$
- Výstupní vlhkost $\omega_B = (10 \div 12)\%$ pro briketování a $\omega_B = (12 \div 13)\%$ pro peletování

4.2 Transformační proces

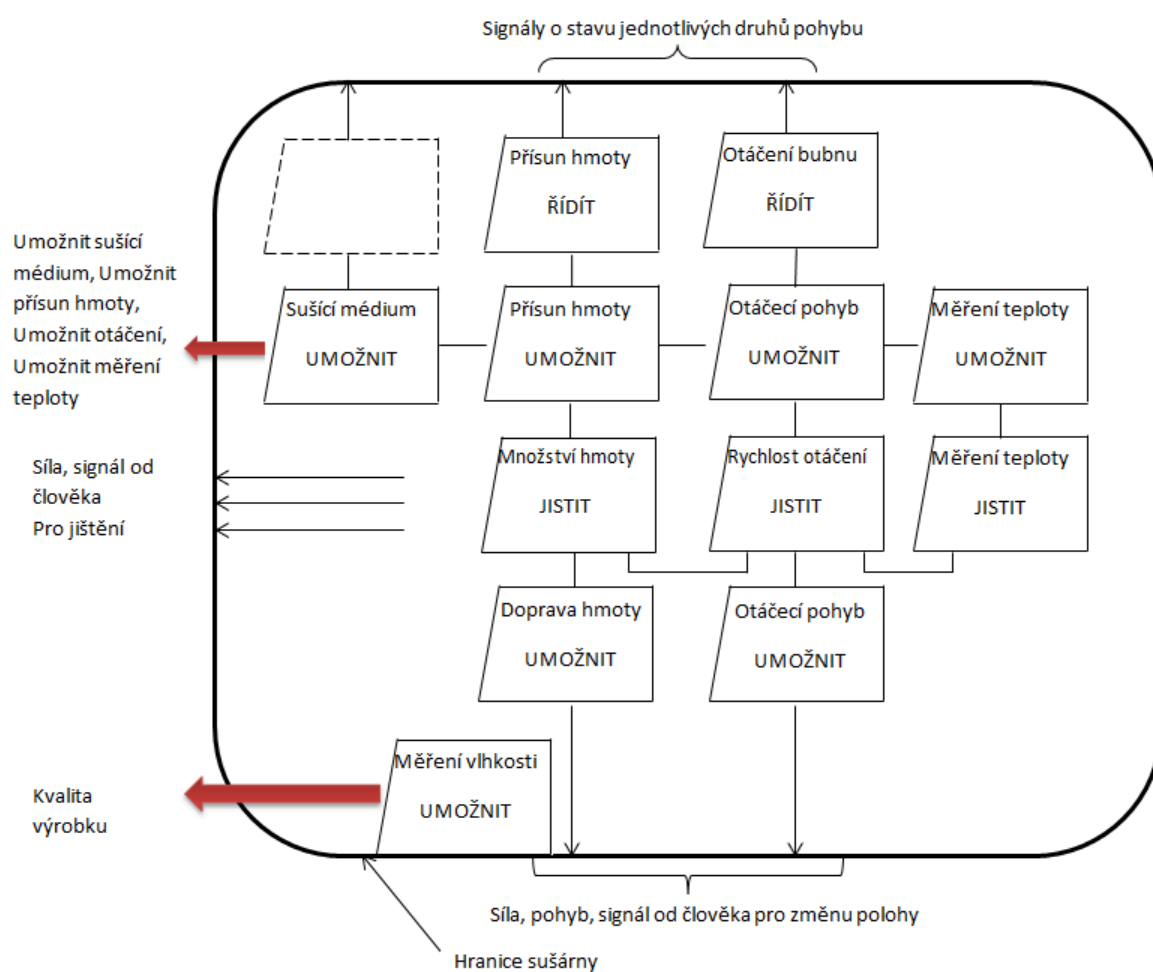


Obrázek 10 Blokové schéma transformačního procesu [7]

<p><u>Předpisy a normy</u> Bez porušení patentových práv Normované nátěry bubnu</p> <p><u>Výroba</u> Kusová</p> <p><u>Ekonomie</u> Konstrukční výrobek Minimální náklady na provoz</p>	
--	--

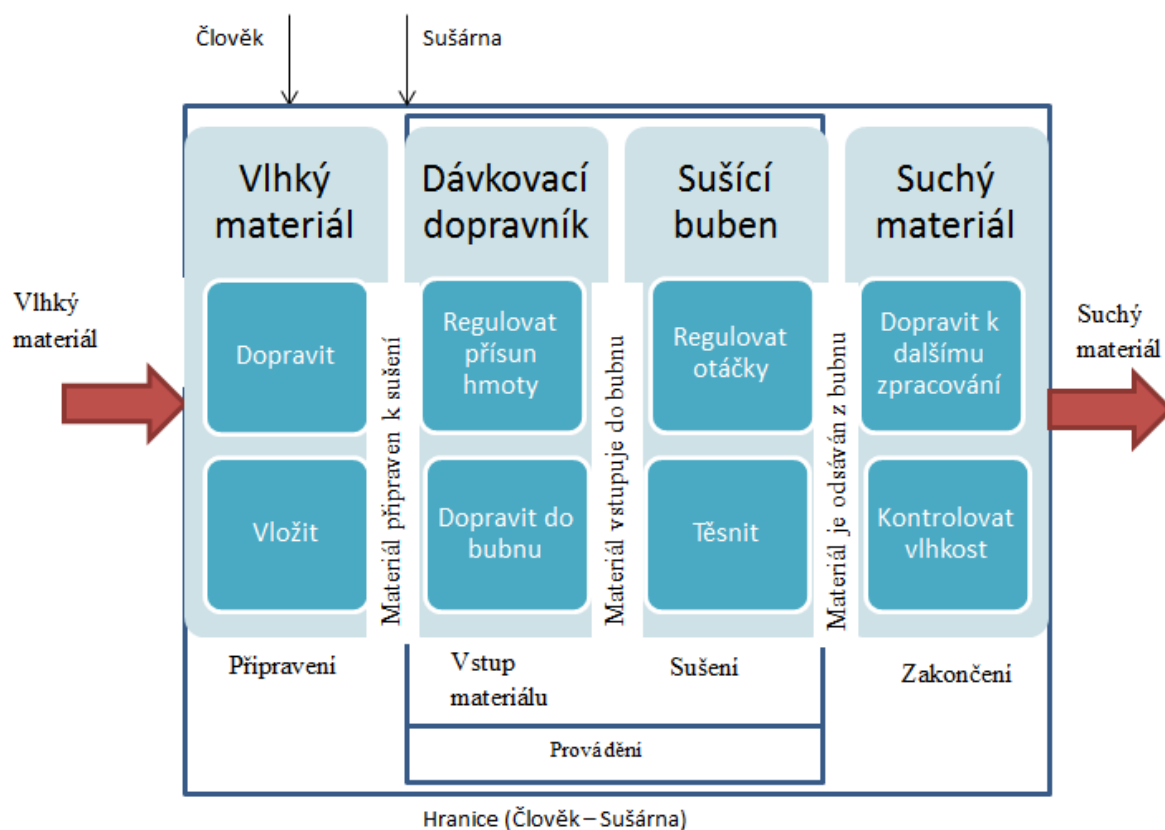
Tabulka 1 Požadavkový list [7]

4.4 Blokové schéma funkční struktury



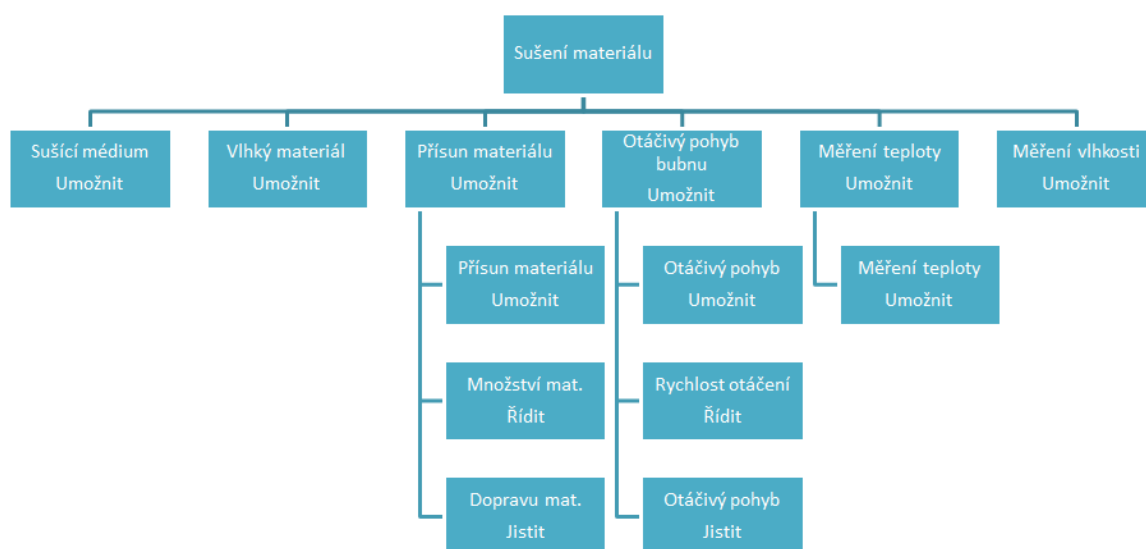
Obrázek 11 Blokové schéma funkční struktury [7]

4.5 Technický proces (pouze hlavní tok)




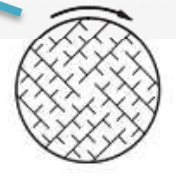
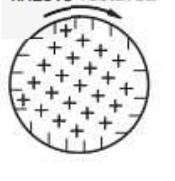
Obrázek 12 Technický proces [7]

4.6 Funkční struktura



Obrázek 13 Funkční struktura [7]

4.7 Morfologická matice

Dílčí funkce		1	2	3
1.	Sušící médium UMOŽNIT	Tuhými palivy	Kapalnými palivy	Plynnými palivy
2.	Vlhký materiál UMOŽNIT	Kolovým nakladačem	Přihrnovacím dopravníkem	
3.	Přísun materiálu UMOŽNIT	Dávkovacím dopravníkem	Ručně	
4.	Množství materiálu ŘÍDIT	Pomocí výstupní teploty sušícího m.	Pomocí výstupní vlhkosti sušeného m.	
5.	Dopravu materiálu JISTIT	Šnekový dopravník	Ručně	
6.	Otáčení bubnu UMOŽNIT	Ozubený převod	Hnací kladka s variátorem	Řetězový převod
7.	Rychlost otáčení ŘÍDIT	Pomocí výstupní teploty sušícího m.	Pomocí výstupní vlhkosti sušeného m.	
8.	Měření teploty UMOŽNIT	Senzory		
9.	Měření vlhkosti UMOŽNIT	Vlhkoměrem		
10.	Pripevnění bubnu Umožnit	Přivařením	Šrouby	
11.	Vestavba prodlouženého bubnu	zvedací vestavba 	příhradková vestavba 	křížová vestavba 

Tabulka 2 Morfologická matice [7]

4.8 Hrubá stavební struktura

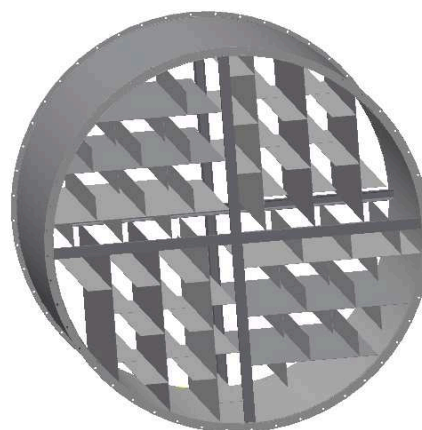
4.8.1 Vybraná řešení

-		Řešení A	Řešení B
1	Sušící médium	Tuhými palivy	Plynnými palivy
2	Vlhký materiál	Kolový nakladač	Ručně
3	Přísun materiálu	Dávkovací dopravník	Ručně
4	Množství materiálu ŘÍDIT	Pomocí výstupní teploty sušícího média	Pomocí výstupní teploty sušícího média
5	Doprava materiálu	Šnekový dopravník	Ručně
6	Otáčení bubnu	Hnací kladka s variátorem	Ozubený převod
7	Rychlost otáčení ŘÍDIT	Pomocí výstupní teploty sušícího média	Pomocí výstupní teploty sušícího média
8	Měření teploty	Senzory	Senzory
9	Měření vlhkosti	Vlhkoměrem	Vlhkoměrem
10	Přípevnění bubnu	Šrouby	Přivařením
11	Vestavba prodl. bubnu	Zvedací	Příhrádková

Tabulka 3 Vybraná řešení [7]



Obrázek 14 Zvedací vestavba

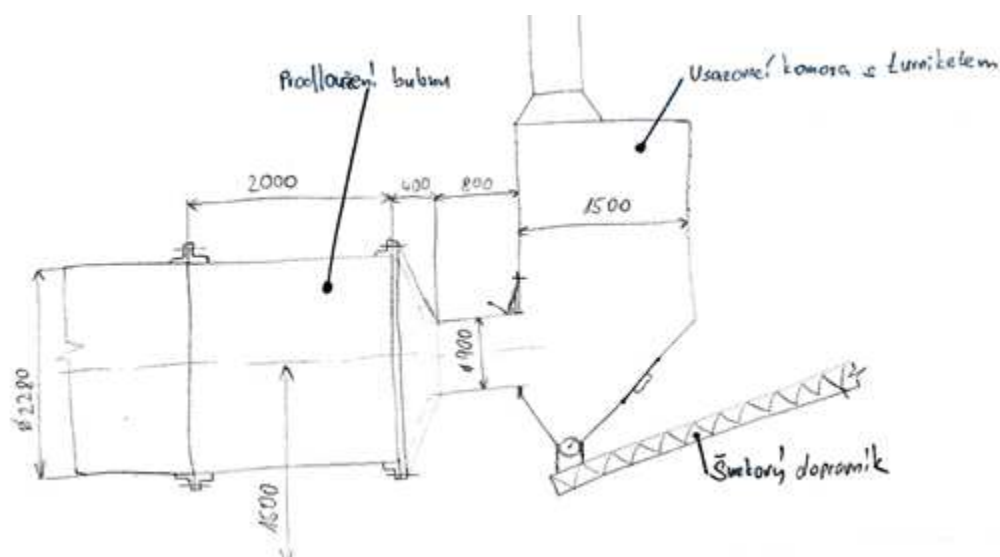


Obrázek 15 Příhrádková vestavba

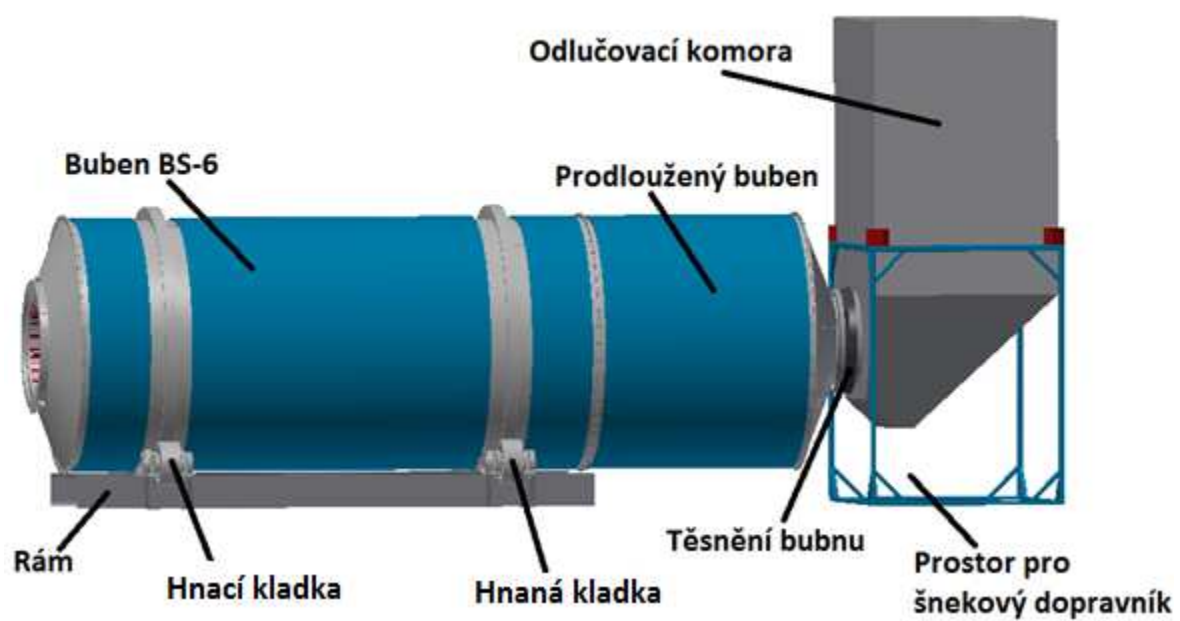
4.8.2 Vybraná řešení

x	Funkce	Hodnocení (jako ve škole)			
Kombinace orgánů - nositelů funkcí	Funkce 1	1	2		
	Funkce 2	1	3		
	Funkce 3	1	3		
	Funkce 4	1	1		
	Funkce 5	1	3		
	Funkce 6	1	1		
	Funkce 7	1	1		
	Funkce 8	1	1		
	Funkce 9	1	1		
	Funkce 10	1	2		
	Funkce 11	1	2		
Sumace hodnocení		11	20		
Celkové pořadí		1.	2.		

Tabulka 4 Vyhodnocení variant [7]



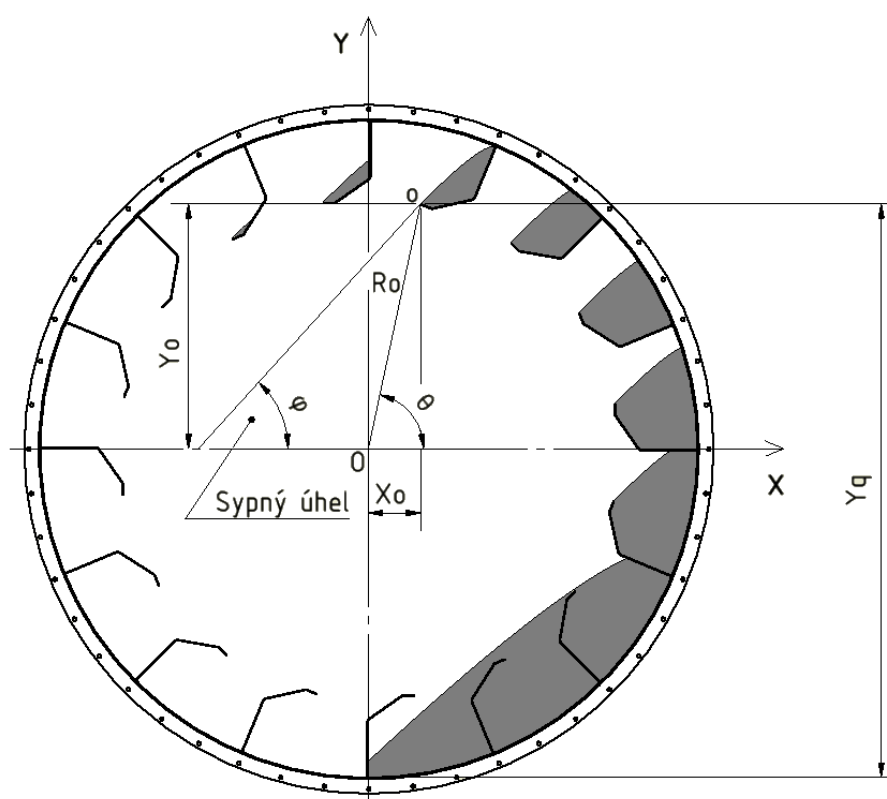
Obrázek 16 Hrubá stavební struktura



Obrázek 17 Úplná stavební struktura

5 Pohyb sušeného materiálu bubnem

Materiál se pohybuje vnitřkem otáčejícího bubnu buď nuceně, spirálovitými dopravními lopatkami, uspořádanými na vnitřním obvodu bubnu, anebo samospádem v bubnu mírně skloněném, kde se látka působením tíže pomalu pohybuje vpřed. V našem případě unáší materiál sušící plyn za pomoci hlavního ventilátoru. U souproudu je doba pobytu materiálu v bubnu kratší než u protiproudu. Lopatky bylo potřeba navrhnout tak, aby dopravily co nejvíce sušeného materiálu do největší možné výšky a následně prodloužili dráhu letu. Sypný úhel závisí na součiniteli tření daného materiálu a je v každé poloze stejný.



Obrázek 18 Schéma sušeného materiálu v bubnu

Kde:	Sypný úhel	φ [°]
	Úhlová poloha špičky lopatky	θ [°]
	Poloměr od středu bubnu ke špičce lopatky	R_0 [m]
	Vzdálenost letu	Y_q [m]

6 Výpočet

Cílem této kapitoly je stanovit množství spalovacího vzduchu a spalin, množství paliva a potřebný objem bubny sušárny pro daný výkon. Sušeným materiálem jsou katrové piliny, hobliny, anebo lesní kůra o vlhkosti (40-60)%. Pro výpočet použijí vlhký materiál o kritické vlhkosti 60%, který má být usušen na konečnou vlhkost 12%. Sušícím médiem budou spaliny ochlazené okolním vzduchem na teplotu 500°C.

6.1 Bilance sušeného materiálu

Vlhkost materiálu na vstupu	$\omega_A = 60\%$
Vlhkost materiálu na výstupu	$\omega_B = 12\%$
Hmotnost usušeného materiálu na výstupu ze sušky	$\dot{m}_B = 2000[kg/hod]$

Množství vlhkého materiálu na vstupu (6.1.1)

$$\dot{m}_A = \dot{m}_B \cdot \frac{1 - \omega_B}{1 - \omega_A} [kg/hod]$$
$$\dot{m}_A = 2000 \cdot \frac{1 - 0,12}{1 - 0,6} = 4400 [kg/hod]$$

Množství vody v sušeném materiálu při vstupu do sušky (6.1.2)

$$\dot{m}_{vA} = \dot{m}_A - \dot{m}_{sm} [kg/hod]$$
$$\dot{m}_{vA} = 4400 - 1760 = 2640 [kg/hod]$$

Množství odpařené vody (6.1.3)

$$\dot{m}_{ov} = \dot{m}_A - \dot{m}_B [kg/hod]$$
$$\dot{m}_{ov} = 4400 - 2000 = 2400 [kg/hod]$$

Množství suchého materiálu (6.1.4)

$$\dot{m}_{sm} = \dot{m}_B \cdot (1 - \omega_B) [kg/hod]$$
$$\dot{m}_{sm} = 2000 \cdot (1 - 0,12) = 1760 [kg/hod]$$

Množství vody v suchém materiálu při výstupu ze sušky (6.1.5)

$$\dot{m}_{vB} = \dot{m}_B \cdot \omega_B [kg/hod]$$
$$\dot{m}_{vB} = 2000 \cdot 0,12 = 240 [kg/hod]$$

6.2 Tepelná bilance sušárny

Měrná tepelná kapacita vodní páry	$c_{vp} = 1840 \text{ [J/kg} \cdot \text{K]}$
Měrná tepelná kapacita vody	$c_v = 4200 \text{ [J/kg} \cdot \text{K]}$
Měrné výparné teplo vody	$r_{FG} = 2500 \text{ [kJ/kg]}$
Počáteční teplota vstupujícího do sušárny	$t_{mA} = 20 \text{ [}^\circ\text{C]}$
Teplota materiálu vystupujícího ze sušárny	$t_{mB} = 50 \text{ [}^\circ\text{C]}$
Teplota spalín vystupujících ze sušárny	$t_{sB} = 70 \text{ [}^\circ\text{C]}$
Teplota varu vody	$t_v = 100 \text{ [}^\circ\text{C]}$

Teplo potřebné k odpaření vody (6.2.1)

$$Q_{ov} = r_{FG} \cdot \dot{m}_{ov} \text{ [MJ]}$$

$$Q_{ov} = 2500 \cdot 2400 = 6000000 \text{ [kJ]} = 6000 \text{ [MJ]}$$

Teplo potřebné k ohřevu vody (6.2.2)

$$Q_{ohv} = c_v \cdot (t_v - t_{mA}) \cdot \dot{m}_{ov} \text{ [MJ]}$$

$$Q_{ohv} = 4200 \cdot (100 - 20) \cdot 2400 = 806400000 \text{ [J]} = 806,4 \text{ [MJ]}$$

Teplo potřebné k ohřevu vodní páry (6.2.3)

$$Q_{ohvp} = c_{vp} \cdot (t_{sB} - t_{mA}) \cdot \dot{m}_{ov} \text{ [MJ]}$$

$$Q_{ohvp} = 1840 \cdot (70 - 20) \cdot 2400 = 220800000 \text{ [J]} = 220,8 \text{ [MJ]}$$

Celkové potřebné teplo (6.2.4)

$$Q_c = Q_{ov} + Q_{ohv} + Q_{ohvp} \text{ [MJ]}$$

$$Q_c = 6000 + 806,4 + 220,8 = 7027,2 \text{ [MJ]}$$

Potřebný tepelný příkon

(6.2.5)

$$P = \frac{Q_c}{3,6} [kW]$$

$$P = \frac{70827,2}{3,6} = 1952 [kW]$$

6.3 Výpočet potřebného objemu bubnu

Kde:	Objem bubnu BS-6	$V_{BS-6} = 19,5 [m^3]$
	Měrná hustota pilin na vstupu	$\rho_A = 260 [kg/m^3]$
	Měrná hustota pilin na výstupu	$\rho_B = 150 [kg/m^3]$
	Součinitel plnění u bubnů s lopatkami	$\varepsilon = 0,1 \div 0,2 [-]$
	Doba sušení stanovená podle zkušeností	$t = 0,5 [hod]$
	Přepočet na sytný metr	$prms = 2,43 [-]$
	Průměr bubnu	$d = 2,28 [m]$
	Délka bubnu	$l = 2 [m]$

Potřebný objem bubnu

(6.3.1)

$$V = \frac{\dot{m}_p \cdot t}{\rho_{SYP} \cdot \varepsilon} [m^3]$$

$$V = \frac{3200 \cdot 0,5}{498,15 \cdot 0,12} = 26,76 [m^3]$$

Průměrný hodinový výkon bubnu

(6.3.2)

$$\dot{m}_p = \frac{\dot{m}_A + \dot{m}_B}{2} [kg/hod]$$

$$\dot{m}_p = \frac{4400 + 2000}{2} = 3200 [kg/hod]$$

Objem po prodloužení (6.3.3)

$$V_{celk} = V_{BS-6} + V_{prodl.} = V_{BS-6} + \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot l [m^3]$$

$$V_{celk} = 19,5 + \frac{\pi \cdot 2,28^2}{4} \cdot 2 = 27,7 [m^3]$$

Sypná hustota látky (6.3.4)

$$\rho_{SYP} = \frac{\rho_A + \rho_B}{2} \cdot prms [kg/m^3]$$

$$\rho_{SYP} = \frac{260 + 150}{2} \cdot 2,43 = 498,15 [kg/m^3]$$

6.4 Vlastnosti paliva

Palivo: Směs dřevního odpadu a pilin

Složení:	Obsah vody	$W = 20 [\%]$
	Obsah uhlíku	$C = 40,7 [\%]$
	Obsah vodíku	$H_2 = 4,6 [\%]$
	Obsah dusíku	$N_2 = 0,1 [\%]$
	Obsah kyslíku	$O_2 = 33,8 [\%]$
	Obsah prchlavé složky síry	$S = 0,0 [\%]$
	Obsah popele	$A_r = 0,8 [\%]$

Celková suma (6.4.1)

$$\Sigma = W + C + H_2 + N_2 + O_2 + S + A_r [\%]$$

$$\Sigma = 20 + 40,7 + 4,6 + 0,1 + 33,8 + 0,0 + 0,8 = 100 [\%]$$

Výhřevnost paliva (6.4.2)

$$Q_i = 34,75 \cdot C + 95,3 \cdot H_2 - 10,9 \cdot (O_2 - S) - 2,5 \cdot W [MJ/kg]$$

$$Q_i = 34,75 \cdot 0,407 + 95,3 \cdot 0,046 - 10,9 \cdot (0,338 - 0) - 2,5 \cdot 0,2 = 14,3429 [MJ/kg]$$

6.5 Stechiometrie

6.5.1 Minimální objemy vzduchu a spalin z prvkového rozboru paliva

Minimální množství kyslíku ke spálení 1kg paliva (6.5.1.1)

$$V_{O_2min} = 22,39 \cdot \left(\frac{C}{12,011} + \frac{H_2}{4,032} + \frac{S}{32} - \frac{O_2}{32} \right) [m^3/kg]$$

$$V_{O_2min} = 22,39 \cdot \left(\frac{0,407}{12,011} + \frac{0,046}{4,032} + 0 - \frac{0,338}{32} \right) = 0,778 [m^3/kg]$$

Minimální množství suchého vzduchu ke spálení 1kg paliva (6.5.1.2)

$$V_{SVmin} = \frac{V_{O_2min}}{0,2103} [m^3/kg]$$

$$V_{SVmin} = \frac{0,778}{0,2103} = 3,698 [m^3/kg]$$

Objem vodní páry na 1m³ suchého vzduchu (6.5.1.3)

Okolní vzduch o relativní vlhkosti 55% a teplotě 20°C

$$V_{H_2O} = \varphi \cdot \frac{p^a}{p_c - p^a} [-]$$

$$V_{H_2O} = 0,55 \cdot 0,024 = 0,013$$

$$\frac{p^a}{p_c - p^a} = 0,024 \text{ pro } 20^\circ C$$

Součinitel f: (6.5.1.4)

Součinitel f je faktor, který vyjadřuje poměrné zvětšení objemu suchého vzduchu o objem vodní páry. Hodnoty f se pohybují v rozmezí 1,01÷1,05.

$$f = 1 + \varphi \cdot \frac{p^a}{p_c - p^a}$$

$$f = 1 + 0,55 \cdot 0,024 = 1,013$$

Minimální množství vlhkého vzduchu ke spálení 1kg paliva: (6.5.1.5)

$$V_{VVmin} = f \cdot V_{SVmin} [m^3/kg]$$

$$V_{VVmin} = 1,013 \cdot 3,698 = 3,746 [m^3/kg]$$

Objemy jednotlivých složek spalin

Oxid uhličitý: (6.5.1.6)

$$V_{CO_2} = \frac{22,26}{12,01} \cdot C + 0,0003 \cdot V_{SVmin} [m^3/kg]$$

$$V_{CO_2} = \frac{22,26}{12,01} \cdot 0,407 + 0,0003 \cdot 3,698 = 0,755 [m^3/kg]$$

Oxid siřičitý: (6.5.1.7)

$$V_{SO_2} = \frac{21,89}{32,06} \cdot S [m^3/kg]$$

$$V_{SO_2} = \frac{21,89}{32,06} \cdot 0,0 = 0,0 [m^3/kg]$$

Dusík: (6.5.1.8)

$$V_{N_2} = \frac{22,4}{28,016} \cdot N_2 + 0,7805 \cdot V_{SVmin} [m^3/kg]$$

$$V_{N_2} = \frac{22,4}{28,016} \cdot 0,001 + 0,7805 \cdot 3,698 = 2,887 [m^3/kg]$$

Argon: (6.5.1.9)

$$V_{Ar} = 0,0092 \cdot V_{SVmin} [m^3/kg]$$

$$V_{Ar} = 0,0092 \cdot 3,698 = 0,034 [m^3/kg]$$

Minimální objem vodní páry ve spalinách (6.5.1.10)

$$V_{H_2Omin} = \frac{44,81}{4,032} \cdot H_2 + \frac{22,41}{18,016} \cdot W + (f - 1) \cdot V_{SVmin} [m^3/kg]$$

$$V_{H_2Omin} = \frac{44,81}{4,032} \cdot 0,046 + \frac{22,41}{18,016} \cdot 0,2 + (1,013 - 1) \cdot 3,698 = 0,808 [m^3/kg]$$

Minimální množství suchých spalin (6.5.1.11)

$$V_{SSmin} = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2} + V_{Ar} [m^3/kg]$$

$$V_{SSmin} = 0,755 + 0,0 + 2,887 + 0,034 = 3,676 [m^3/kg]$$

Minimální množství vlhkých spalin (6.5.1.12)

$$V_{VSmin} = V_{SSmin} + V_{H_2Omin} [m^3/kg]$$

$$V_{VSmin} = 3,676 + 0,808 = 4,484 [m^3/kg]$$

Maximální množství CO₂ ve spalinách (6.5.1.13)

$$V_{CO_2max} = \frac{V_{CO_2}}{V_{SSmin}} \cdot 100 [\%]$$

$$V_{CO_2max} = \frac{0,755}{3,676} \cdot 100 = 20,54 [\%]$$

6.5.2 Minimální objemy vzduchu a spalin z hrubého rozboru paliva

Minimální množství suchého vzduchu ke spálení 1kg surového paliva o výhřevnosti Q_i (6.5.2.1)

$$V_{SVmin}^{SP} = 0,5 + 1,012 \cdot \frac{Q_i}{4190} [m^3/kg]$$

$$V_{SVmin}^{SP} = 0,5 + 1,012 \cdot \frac{14342,9}{4190} = 3,964 [m^3/kg]$$

Minimální množství vlhkých spalin při použití suchého vzduchu (6.5.2.2)

$$V_{VSmin}^{SV} = 1,375 + 0,95 \cdot \frac{Q_i}{4190} [m^3/kg]$$

$$V_{VSmin}^{SV} = 1,375 + 0,95 \cdot \frac{14342,9}{4190} = 4,627 [m^3/kg]$$

6.5.3 Součinitel přebytku vzduchu a skutečné objemy vzduchu a spalin

Součinitel přebytku vzduchu

Součinitel přebytku vzduchu udává poměr mezi teoretickým množstvím vzduchu, které je nutné pro ideální spalování a skutečným množstvím vzduchu přivedeného do spalovací komory.

Vysoký součinitel přebytku vzduchu snižuje účinnost a zhoršuje komínovou ztrátu. Nízký součinitel přebytku vzduchu může vést k místnímu nedokonalému spalování, což je následkem zvýšením ztrát chemickým nedopalkem a snižuje teplo uvolněné v ohništi. Pro roštové ohniště se součinitel přebytku vzduchu pohybuje v rozmezí $1,25 \div 1,5$. Pro výpočet použijí $\alpha = 1,3$.

Skutečné množství vlhkých spalin (6.5.3.1)

$$V_{VS} = V_{VSmin} + (\alpha - 1) \cdot V_{VVmin} [m^3/kg]$$

$$V_{VS} = 4,484 + (1,3 - 1) \cdot 3,746 = 5,608 [m^3/kg]$$

Skutečné množství vodní páry (6.5.3.2)

$$V_{H_2O} = V_{H_2Omin} + (f - 1) \cdot (\alpha - 1) \cdot V_{SVmin} [m^3/kg]$$

$$V_{H_2O} = 0,808 + (1,013 - 1) \cdot (1,3 - 1) \cdot 3,698 = 0,822 [m^3/kg]$$

Objemové podíly ve vlhkých spalinách (6.5.3.3)

$$\omega_{VS N_2} = \frac{V_{N_2}}{V_{VS}} = \frac{2,887}{5,608} = 0,5148 = 51,48 [\%]$$

$$\omega_{VS H_2O} = \frac{V_{H_2O}}{V_{VS}} = \frac{0,822}{5,608} = 0,1466 = 14,66 [\%]$$

$$\omega_{VS vzd} = \frac{[(\alpha - 1) \cdot V_{VVmin}]}{V_{VS}} = \frac{[(1,3 - 1) \cdot 3,746]}{5,608} = 0,2004 = 20,04 [\%]$$

$$\omega_{VS CO_2} = \frac{V_{CO_2}}{V_{VS}} = \frac{0,755}{5,608} = 0,1346 = 13,46 [\%]$$

$$\omega_{VS A_r} = \frac{V_{A_r}}{V_{VS}} = \frac{0,034}{5,608} = 0,006 = 0,6 [\%]$$

$$\omega_{VS SO_2} = \frac{V_{SO_2}}{V_{VS}} = \frac{0}{5,608} = 0 = 0 [\%]$$

Celková suma (6.5.3.4)

$$\Sigma = \omega_{VS N_2} + \omega_{VS H_2O} + \omega_{VS vzd} + \omega_{VS CO_2} + \omega_{VS A_r} + \omega_{VS SO_2}$$

$$\Sigma = 51,48 + 14,66 + 20,04 + 13,46 + 0,6 + 0 = 100,24 [\%]$$

6.5.4 Entalpie spalin

Sušárna pracuje hospodárněji, čím vyšší je vstupní teplota sušícího plynu. Vysokých teplot se dosáhne nejlevněji spalinami, takže se jich v sušárnách stále více používá jako sušícího plynu tam, kde sušená látka snese vyšší teplotu i styk se spalinami.

Entalpie složek spalin při 500[°C]:

$$i_{CO_2} = 994[kJ/m^3]$$

$$i_{N_2} = 666[kJ/m^3]$$

$$i_{H_2O} = 795[kJ/m^3]$$

$$i_{SO_2} = 1070[kJ/m^3]$$

$$i_{A_r} = 465[kJ/m^3]$$

Entalpie minimálního množství spalin (6.5.4.1)

$$I_{SPmin} = V_{CO_2} \cdot i_{CO_2} + V_{SO_2} \cdot i_{SO_2} + V_{N_2} \cdot i_{N_2} + V_{H_2Omin} \cdot i_{H_2O} + V_{A_r} \cdot i_{A_r}$$

$$I_{SPmin} = (0,755 \cdot 994) + (0 \cdot 1070) + (2,887 \cdot 666) + (0,808 \cdot 795) + (0,034 \cdot 465)$$

$$I_{SPmin} = 3331,4 [kJ/kg]$$

Entalpie minimálního množství vzduchu: (6.5.4.2)

$$I_{vzdmin} = V_{SVmin} \cdot c_{pv} \cdot t_{vzd} [kJ/kg]$$

$$I_{vzdmin} = 3,698 \cdot 1,298 \cdot 20 = 96 [kJ/kg]$$

Entalpie spalín při přebytku vzduchu (6.5.4.3)

$$I_{SP} = I_{SP_{min}} + (\alpha - 1) \cdot I_{vzd_{min}} [kJ/kg]$$

$$I_{SP} = 3331,4 + (1,3 - 1) \cdot 96 = 3360,2 [kJ/kg]$$

Entalpie vzduchu při přebytku vzduchu (6.5.4.4)

$$I_{vzd} = \alpha \cdot I_{vzd_{min}} [kJ/kg]$$

$$I_{vzd} = 1,3 \cdot 96 = 124,8 [kJ/kg]$$

6.5.5 Doplnující výpočty

Účinnost kotle

Pro sušící linku bude použit kotel Fiedler, kde výrobce uvádí minimální účinnost 86%.

Výpočet množství paliva (6.5.5.1)

$$\dot{m} = \frac{P}{Q_i \cdot \frac{\eta_K}{100}} [kg/hod]$$

$$\dot{m} = \frac{1952}{14342,9 \cdot \frac{86}{100}} = 0,117 [kg/s] = 421,35 [kg/hod]$$

Množství spalín vstupujících do sušárny (6.5.5.2)

$$V_{CEL} = V_{VS} \cdot \dot{m} [m^3/hod]$$

$$V_{CEL} = 5,608 \cdot 421,35 = 2362,9 [m^3/hod]$$

Množství spalín vystupujících ze sušárny (6.5.5.3)

$$V_{CELout} = V_{CEL} + \frac{m_{ov}}{\rho_{H_2O}} [m^3/hod]$$

$$V_{CELout} = 2362,9 + \frac{2400}{958,35} = 2365,4 [m^3/hod]$$

Vlhkost spalín vstupujících do sušárny

(6.5.5.4)

$$x_{1B} = \frac{V_{H_2O}}{V_{VS}} [-]$$

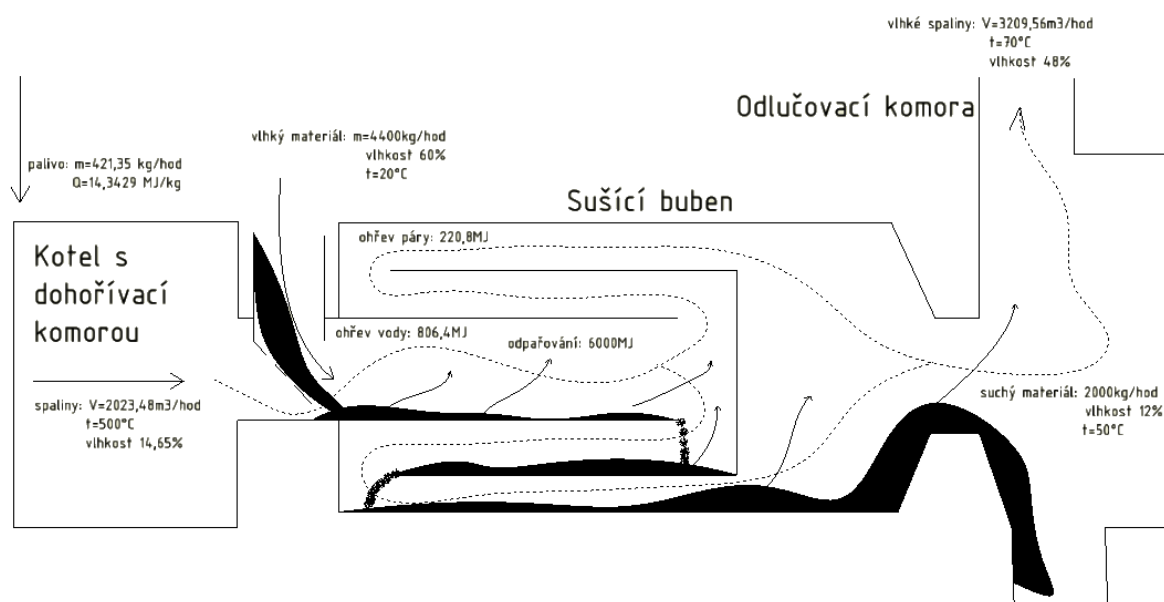
$$x_{1B} = \frac{0,822}{5,608} = 0,1465 [-]$$

Vlhkost spalín vystupujících ze sušárny

(6.5.5.5)

$$x_{2B} = \frac{\frac{\tau \cdot V_{CEL} \cdot \frac{x_{1B}}{1-x_{1B}} + m_v}{\tau \cdot V_{CEL}}}{1 + \frac{\tau \cdot V_{CEL} \cdot \frac{x_{1B}}{1-x_{1B}} + m_v}{\tau \cdot V_{CEL}}} [-]$$

$$x_{2B} = \frac{\frac{2023,48 \cdot \frac{0,1465}{1-0,1465} + 1520}{1 \cdot 2023,48}}{1 + \frac{1 \cdot 2023,48 \cdot \frac{0,1465}{1-0,1465} + 1520}{1 \cdot 2023,48}} = 0,48 [-]$$



Obrázek 19 Celkové schéma sušení

6.6 Pevnostní výpočet

6.6.1 Kontrola připojovacích šroubů prodlouženého bubnu

Buben bude přišroubován ke kruhové přírubě stávajícího bubnu. Příruba je vyrobena z rovnoramenného profilu L 50 x 5 a obsahuje 48 děr pro šrouby velikosti M14. K uchycení prodlouženého bubnu se vyrobí stejný protikus se stejným počtem děr a přenos síly musí být zajištěn pouze třením s bezpečností $k=1,3$ (šrouby nesmí být namáhány na střih). Součinitel smykového tření mezi přírubami $f_k=0,26$, součinitel smykového tření pod maticí $f_m=0,17$ a součinitel tření v závitové drážce $f'_z = 0,13$. Šrouby budou z materiálu skupiny 8.8. Bezpečnost k mezi kluzu $k_s=2,4$

Šrouby jsou umístěny v kruhovém poli, tím pádem budou stejné momentové síly ve všech šroubech. V horní části příruby budou šrouby namáhány na tah a v dolní části na tlak. Síla G o velikosti 15912,78N se skládá z prodlouženého bubnu, lopatek, výstupního víka, sušeného materiálu a těsnění bubnu a působí v těžišti.

Momentová rovnice rovnováhy:

(6.6.1.1)

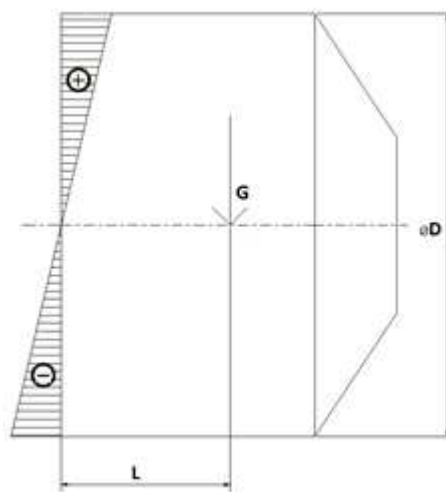
$$\sum M_i = 0$$

$$M_G = G \cdot L = F_M \cdot \phi D$$

Momentová síla (6.6.1.1)

$$F_M = \frac{G \cdot L}{\phi D} [N]$$

$$F_M = \frac{15912,78 \cdot 1,047}{2,35} = 7089,65 [N]$$



Obrázek 20 Průběh napětí v přírubě

Posouvající síla

(6.6.1.2)

$$F_t > G$$

$$F_N \cdot f = k \cdot G$$

$$F_N = \frac{k \cdot G}{f_k} [N]$$

$$F_N = \frac{1,3 \cdot 15912,78}{0,26} = 79563,9 [N]$$

Celková svěrná síla

(6.6.1.3)

$$F_O = F_M + F_N [N]$$

$$F_O = 7089,65 + 79563,9 = 86653,55 [N]$$

Svěrná síla v jednom šroubu

(6.6.1.4)

$$F_{oi} = \frac{F_o}{i} [N]$$

$$F_{oi} = \frac{68653,55}{48} = 1805,28 [N]$$

Pro šroub M14x1,5 :

$$\varnothing d_2 = 13,026 [mm]$$

$$\varnothing d_3 = 12,160 [mm]$$

$$P_h = 1,5 [mm]$$

Dovolené napětí v tahu

(6.6.1.5)

$$\sigma_{dovt} = \frac{Re}{k_s} = \frac{8 \cdot 8 \cdot 10}{2,4} = 266 [MPa]$$

Úhel stoupání závitu

(6.6.1.6)

$$\gamma = \arctan \left(\frac{P_h}{\pi \cdot d_2} \right) [^\circ]$$

$$\gamma = \arctan \left(\frac{1,5}{\pi \cdot 13,026} \right) = 2,099 [^\circ]$$

Úhel tření v závitu (6.6.1.7)

$$\varphi' = \arctan \cdot f_z' [^\circ]$$

$$\varphi' = \arctan \cdot 0,13 = 7,407 [^\circ]$$

Napětí v tahu (6.6.1.8)

$$\sigma_t = \frac{F_{oi}}{\frac{\pi \cdot d_3^2}{4}} [MPa]$$

$$\sigma_t = \frac{1805,28}{\frac{\pi \cdot 12,160^2}{4}} = 15,54 [MPa]$$

Smykové napětí (6.6.1.9)

$$\tau = \frac{M_z}{W_k} = \frac{F_{oi} \cdot \frac{d_2}{2} \cdot \tan(\gamma + \varphi')}{\frac{\pi \cdot d_3^3}{16}} [MPa]$$

$$\tau = \frac{M_z}{W_k} = \frac{1805,28 \cdot \frac{13,026}{2} \cdot \tan(2,099 + 7,407)}{\frac{\pi \cdot 12,160^3}{16}} = 5,57 [MPa]$$

Redukované napětí (6.6.1.10)

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma_t^2 + 3 \cdot \tau^2} [MPa]$$

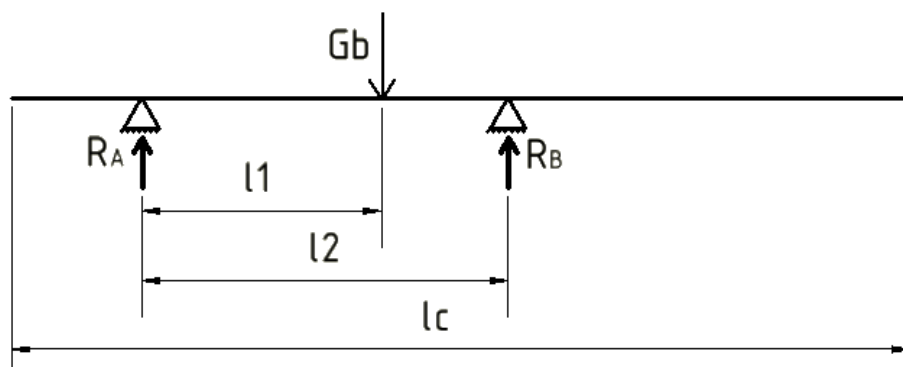
$$\sigma_{red} = \sqrt{15,54^2 + 3 \cdot 5,57^2} = 18,29 [MPa]$$

$$\sigma_{red} < \sigma_{dovt}$$

$$\underline{18,29 [MPa] < 266 [MPa]}$$

6.6.2 Výpočet třecí síly

Prodloužením bubnu se změní celkové těžiště. Přední kladky budou nadlehčovány, kdežto zadní kladky budou o to více zatíženy. Cílem této kapitoly je spočítat procentuální rozdíl třecí síly v přední hnací kladce bubnu a srovnat jej s původním stavem, kde na obě kladky působily stejné síly. Pro výpočet použijí pouze váhu nezaplněného bubnu, protože zaplněním se třecí síla zvětší důsledkem hmotnosti vlhkých pilin na vstupu do bubnu.



Obrázek 21 Schéma zatížení kladek vlastní tíhou bubnu

Kde:	Zatížení způsobené vlastní tíhou bubnu	$G_B = 55982,7 \text{ [N]}$
	Vzdálenost od hnací kladky do těžiště bubnu	$l_1 = 2,027 \text{ [m]}$
	Vzdálenost mezi hnací a hnanou kladkou	$l_2 = 3,167 \text{ [m]}$

Výpočet reakcí: (6.6.2.1)

$$\sum F_y: R_A - G_B + R_B = 0 \rightarrow R_A = G_B - R_B \text{ [N]}$$

$$R_A = 55982,7 - 35831 = 20151,7 \text{ [N]}$$

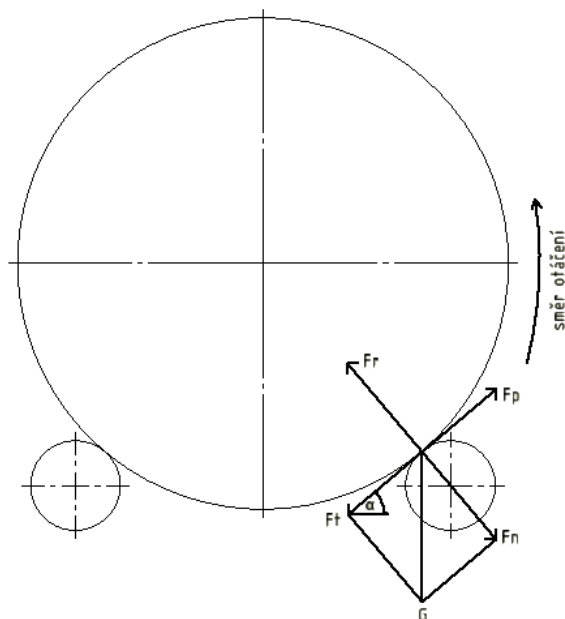
$$M_{RA}: G_b \cdot l_1 - R_B \cdot l_2 = 0 \rightarrow R_B = \frac{G_b \cdot l_1}{l_2} \text{ [N]}$$

$$R_B = \frac{55982,7 \cdot 2,027}{3,167} = 35831 \text{ [N]}$$

Reakce v přední kladce bubnu (2 kladky):

(6.6.2.2)

$$R_{AK} = \frac{R_A}{2} = \frac{20151,7}{2} = 10075,9 \text{ [N]}$$



Obrázek 22 Rozložení působících sil na hnací kladku

Kde:

$$R_{AK} = G = 10075,9 \text{ [N]}$$

$$\alpha = 40 \text{ [}^\circ\text{]}$$

$$f_t = 0,23[-]$$

Výpočet třecí síly

(6.6.2.3)

$$F_t = R_{AK} \cdot \sin \alpha \cdot f_t \text{ [N]}$$

$$F_t = 10075,9 \cdot \sin 40 \cdot 0,23 = 1489,6 \text{ [N]}$$

Třecí síla v původním stavu vychází na 1782,7[N]. Prodloužením bubnu zmenšíme třecí sílu o 16,4%. Tato třecí síla se ještě zmenší naplněním bubnu sušeným, vlhkým materiálem.

7 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo navrhnout konstrukční úpravu bubnové sušárny typu BS-6 s cílem navýšení výkonu o 100%.

Navržená sušárna s požadovaným výkonem 2000kg/hod je počítána s maximální vlhkostí sušeného materiálu 60%. Při sušení takto vlhkého materiálu je třeba dodat tepelný výkon 1,95MW. Ve výpočtech jsem nepočítal s tepelnými ztrátami (např. ohřev konstrukčních částí materiálu bubnu nebo ztrátami průchodem tepla stěnami) a není dobré, když zařízení stále pracuje na maximální výkon, tak při výběru vhodného kotle by bylo dobré počítat s rezervou zhruba o 10-15%. Pro výkon 2t/hod byl objem stávajícího bubnu nedostatečný a proto bylo nezbytně nutné tento objem navýšit. Prodloužením bubnu v jeho zadní části o 2m jsme získali užitečný objem, který je dostatečný pro daný výkon. Buben bude přišroubován k přírubě stávajícího bubnu šrouby, které s přehledem vydrží. Při výběru vhodné vestavby k prodlouženému bubnu byl brán zřetel na změnu celkového těžiště bubnu, které má nežádoucí vliv na odlehčení bubnu v přední hnané části, což je následkem menší třecí síly mezi hnací kladkou a věncem bubnu. Tento pokles třecí síly je zhruba o 16,4% menší než v předchozím stavu. Dále byla stanovena spotřeba paliva o dané výhřevnosti Q_i . Spotřeba paliva pro sušení 2t/hod se pohybuje okolo 420kg/hod. Spálením tohoto paliva se vyprodukuje 2362,9 m³/hod spalin, které jsou před vstupem do sušárny ochlazeny v dohořivací komoře na 500°C. V bubnu pak pohltní přebytečnou vodu z pilin. Suché piliny jsou odsávány hlavním ventilátorem do odlučovací komory, kde se odloučí od vlhkých spalin a jsou dále zpracovány ve formě briket nebo pelet.

Seznam použité literatury

- [1] *STROJNÍ SUŠENÍ*. 1956. vyd. Spálená 51, Praha II: Státní nakladatelství technické literatury, 1956. ISBN L13-B3-2-I.
- [2] *PELETY: Palivo budoucnosti*. České Budějovice: Sdružení Harmonie, 2003. ISBN 80-239-1956-3.
- [3] *BIOMASA: obnovitelný zdroj energie*. Pod Vodárenskou věží 4, 182 08 Praha 8: FCC PUBLIC s.r.o., 2011. ISBN 80-86534-06-5.
- [4] *TEPELNÉ POCHODY*. Vazovova 5, Bratislava: STU, 2004. ISBN 80-227-2109-3.
- [5] *STROJNICKÉ TABULKY: Třetí doplněné vydání*. Úvaly: Albra, 2006. ISBN 80-7361-033-7.
- [6] *ŘEŠENÉ PŘÍKLADY Z ČÁSTÍ A MECHANISMŮ STROJŮ: Spoje*. Ostrava, 2002. ISBN 80-248-0050-0.
- [7] *KONSTRUKČNÍ NAUKA: Obecný model postupu při konstruování*. Zürich: Heurista, 1995. ISBN 80-90-1135-0-8.
- [8] *PARNÍ KOTLE: podklady pro tepelný výpočet*, VUT v Brně, 1992

Internetové zdroje

- [1] Briketovacilisy.cz. Briketovací lisy [online]. 2014 [cit. 2014-05-15]. Dostupné z: <http://www.briketovacilisy.cz/>
- [2] Susarny-konel.cz. *Průběh rychlosti sušení* [online]. 2014 [cit. 2014-05-15]. Dostupné z: <http://www.susarny-konel.cz/www-susarny-konel-cz/5-Co-je-suseni>
- [3] Briklis.cz. *Bubnová sušárna pilin BUS* [online]. 2014 [cit. 2014-05-15]. Dostupné z: <http://www.briklis.cz/susarny-linky/susarny-pilin/>
- [4] Firemní podklady společnosti *Biomac Ing. Černý s.r.o.*
- [5] Dieffenbacher.de. *Bubnová sušárna* [online]. 2014 [cit. 2014-05-15]. Dostupné z: <http://www.dieffenbacher.de/holzplattentechnik/pelletanlagen/einzug-trommeltrockner.html>

Seznam obrázků

Obrázek 1	Mechanický briketovací lis
Obrázek 2	Hydraulický briketovací lis
Obrázek 3	Granulační lis 1000kg/hod
Obrázek 4	Peletovací lis 50kg/hod
Obrázek 5	Průběh rychlosti sušení
Obrázek 6	Bubnová sušárna pilin BUS
Obrázek 7	Sušící buben BS-6
Obrázek 8	Bubnová rotační sušárna společnosti DIEFFENBACHER
Obrázek 9	Jednoplášťová bubnová sušárna
Obrázek 10	Blokové schéma transformačního procesu
Obrázek 11	Blokové schéma funkční struktury
Obrázek 12	Technický proces
Obrázek 13	Funkční struktura
Obrázek 14	Zvedací vestavba
Obrázek 15	Přihrádková vestavba
Obrázek 16	Hrubá stavební struktura
Obrázek 17	Úplná stavební struktura
Obrázek 18	Schéma sušeného materiálu v bubnu
Obrázek 19	Celkové schéma sušení
Obrázek 20	Průběh napětí v přírubě
Obrázek 21	Schéma zatížení kladek vlastní tíhou bubnu

Seznam tabulek

Tabulka 1	Požadavkový list
Tabulka 2	Morfologická matice
Tabulka 3	Vybraná řešení
Tabulka 4	Vyhodnocení variant

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat Ing. Nogovi, CSc. za odborné vedení, cenné rady a připomínky a dále Ing. Černému za jeho čas a poskytnutí podkladových materiálů pro vypracování bakalářské práce. Dále děkuji své rodině za vytvoření příjemných podmínek pro tvorbu a své přítelkyni za podporu během tvorby bakalářské práce.

Seznam příloh

1 – Výkresová dokumentace

2 – Datový nosič CD